



Evaluación de la vegetación del Golfo de Urabá durante los últimos 1000 años a partir del análisis del contenido sedimentario de n-alcenos

Luisa María Vergara Bedoya

Jhohan Andres Rudas Gallego

Trabajo de grado presentado para optar al título de Oceanógrafa y Ecológo de Zonas Costeras

Asesores

Heazel Janinne Grajales Vargas, Dra. MSc. I.C.

Alex Fernando Rúa Cardona, Dr. MSc. I.Q.

Universidad de Antioquia
Instituto de Ciencias del Mar
Oceanografía y Ecología de Zonas Costeras
Turbo, Antioquia, Colombia

2024

Cita

(Rudas Gallego & Vergara Bedoya, 2024)

Referencia**Estilo APA 7 (2020)**

Rudas Gallego, J., & Vergara Bedoya, L. A. (2024). *Evaluación de la vegetación del Golfo de Urabá durante los últimos 1000 años a partir del análisis del contenido sedimentario de n-alcános* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.



Biblioteca Sede Ciencias del Mar (Turbo)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A Dios, siempre gracias y a mi madre, mi vida y mis logros. A Oscar Vergara, mi tío, mi ejemplo, y el pilar mas grande de este sueño Mis hermanos, mi abuela y a mi Pelu, mi fiel compañera.

Luisa María Vergara Bedoya

Dedicatoria

A mi padre, Ambrosio Leus Rudas Pico, por ser mi guía, mi ejemplo de esfuerzo y dedicación. A mi familia, por su amor incondicional y apoyo constante, especialmente a Alejandra Patricia Gallego y a mi hermano Nicolas Rudas, quienes han sido mi sostén en cada paso de este camino, a mis abuelos, ya que su amor perdura en mí. Gracias a la vida misma por ser la fuente de inspiración detrás de cada logro.

Jhohan Andres Rudas Gallego

Agradecimientos

Agradecer especialmente a mi compañero, por ser un apoyo de principio a fin, por su disposición y compromiso, en especial, por ser en quien puedo recaer siempre. A nuestra asesora, la profe Heazel, gracias por confiar en nosotros, por guiarnos y acompañarnos de la mejor manera, gracias por motivarnos y no permitirnos el rendirnos. A nuestro asesor Alex Rúa, por su disposición y acompañamiento en este proceso. A todos los docentes que nos acompañaron y fueron nuestra guía en este proceso.

Luisa María Vergara Bedoya.

Agradecimientos

Agradecer igualmente a mi compañera de tesis y vida, Luisa Maria Vergara, por su apoyo incondicional, su paciencia y amor, que han sido mi motor durante esta etapa de mi vida, a mis asesores, Heazel y Alex Rúa, por su orientación experta, su dedicación y su invaluable contribución a este trabajo, agradezco también a cada uno de mis profesores por su paciencia, sabiduría y por guiarme en el camino del conocimiento. Y, por último, pero no menos importante, a mis compañeros, en especial a Marcial Moya, Jhonmar Cordoba, Javier Venegas, Marco Boto, Carlos Nobles y Carlos Sisquiarco, por los momentos de diversión y ayuda en cada paso de este camino académico.

Jhohan Andrrres Rudas Gallego.

Tabla de contenido

Resumen	9
Abstract	10
1. Introducción	11
2. Objetivos	16
2.1 Objetivo general	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. Metodología	18
3.1 Área de estudio.....	18
3.2 Trabajo en Campo	19
3.3 Preparación de extractos	20
3.4 Determinación de hidrocarburos y cronología.....	20
3.5 Estratigrafía y cronología	20
3.6 Determinación de índices de n-alcanos	21
3.7 Análisis estadístico	23
4. Resultados	24
4.1 Estratigrafía y cronología	24
4.2 n-alcanos	24
4.3 Índices de n-alcanos	25
4.4 Comparación de índices entre periodos climáticos	27
4.5 Correlaciones	28
5. Discusión	30
6. Conclusiones	35
7. Recomendaciones	36
8. Referencias	37

Lista de tablas

Tabla 1 índices de n-alcanos comúnmente utilizados en estudios previos para identificar las fuentes de materia orgánica en los sedimentos	23
Tabla 2 Estadísticos descriptivos de los índices de n-alcanos registrados en el perfil sedimentario del Frente Deltaico del río Atrato.....	26
Tabla 3 Coeficiente Rho de Spearman entre los índices de n-alcanos y la edad del perfil sedimentario del Frente Deltaico del río Atrato	29

Lista de figuras

Figura 1 Ubicación geográfica del Golfo de Urabá y del sitio de muestreo en el Frente Deltaico del río Atrato	19
Figura 2 Estratigrafía y edad del perfil sedimentario del Frente Deltaico del río Atrato	24
Figura 3 Concentraciones medias de n-alcanos en tres rangos de profundidad del perfil sedimentario del Frente Deltacio del río Atrato	25
Figura 4 Índices de n-alcanos para el perfil sedimentario del Frente Deltaico del río Atrato	27
Figura 5 Diagramas de cajas y bigotes para los índices de n-alcanos del perfil sedimentario del Frente Deltaico del río Atrato	28
Figura 6 Representación esquemática de las correlaciones entre índices de n-alcanos y la edad del perfil sedimentario del frente Deltaico del río Atrato	29

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ACL	Longitud media de la cadena
A.D	anno domini
CPI	Preferencia de carbono
CWP	Período cálido actual
LIA	La pequeña era del hielo
MWP	Período cálido medieval
PAQ	Abundancia de macrofitas
TAR	Relación terrígenos-acuáticos

Resumen

Los hidrocarburos se encuentran entre los principales grupos de lípidos de interés geoquímico y junto a los ácidos grasos son los biomarcadores de mayor resistencia a la degradación ambiental y antrópica. El análisis de la abundancia de hidrocarburos como los n-alcanos revela información paleoambiental que permite inferir los cambios y aportes de material vegetal a los sedimentos estuarinos. En esta investigación se buscó reconstruir las trayectorias sucesionales de la vegetación en el sistema estuarino del Golfo de Urabá, a través del análisis de biomarcadores de n-alcanos presentes en un perfil sedimentario deltaico de 2 m de longitud, segmentado cada 5 cm. Para esto se determinó el contenido de hidrocarburos de cadena larga en las muestras mediante cromatografía de gases acoplado a masas (GC-MS) con columna capilar J&W DB 5. Posteriormente, se calcularon los siguientes índices de n-alcanos: relación terrígenos-acuáticos (TAR), abundancia de macrófitas (Paq), longitud media de cadena (ACL) y preferencia de carbono (CPI). Los resultados sugieren una composición compleja y heterogénea de la materia orgánica en el área de estudio, compuesta tanto por plantas terrestres como plantas acuáticas. Durante la pequeña era del hielo (LIA), los mayores aportes correspondieron a plantas terrestres, mientras que en periodos cálidos y húmedos como el periodo cálido actual (CWP) o el cálido medieval (MWP) hubo ingresos significativos de plantas acuáticas emergentes o flotantes.

Palabras clave: biomarcadores, n-alcanos, materia orgánica sedimentaria, índices de n-alcanos, Golfo de Urabá

Abstract

Hydrocarbons are among the main groups of lipids of geochemical interest and, together with fatty acids, are the biomarkers of greatest resistance to environmental and anthropogenic degradation. The analysis of the abundance of hydrocarbons such as n-alkanes reveals paleoenvironmental information that allows inferring the changes and contributions of plant material to estuarine sediments. In this research we sought to reconstruct the successional trajectories of vegetation in the estuarine system of the Gulf of Urabá, through the analysis of biomarkers of n-alkanes present in a 2 m long deltaic sedimentary profile, segmented every 5 cm. The content of long-chain hydrocarbons in the samples was determined by gas chromatography coupled to mass (GC-MS) with a J&W DB 5 capillary column. Subsequently, the following n-alkane indices were calculated: terrigenous-to-aquatic ratio (TAR), macrophyte abundance (P_{aq}), average chain length (ACL) and carbon preference (CPI). The results suggest a complex and heterogeneous composition of organic matter in the study area, composed of both terrestrial and aquatic plants. During the Little Ice Age (LIA), the largest inputs corresponded to terrestrial plants, while in warm and wet periods such as the Current Warm Period (CWP) or Medieval Warm Period (MWP) there were significant inputs of emergent or floating aquatic plants.

Keywords: biomarkers, n-alkanes, sedimentary organic matter, n-alkane indices, Gulf of Urabá, biomarkers, n-alkanes, sedimentary organic matter, Gulf of Urabá

1. Introducción

Los humedales son zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, donde el agua cubre el suelo de forma estacional o permanente (Arias y Brix, 2003). Estos ecosistemas se caracterizan por combinar áreas de aguas superficiales durante gran parte del año y una vegetación específica (Marulanda et al., 2003), que les permite proveer servicios ecosistémicos entre los que se cuentan: i) soporte de la biodiversidad, ii) retención de gases de efecto invernadero y sedimentos, iii) depuración y regulación de aguas superficiales, iv) regulación de ciclos bioquímicos, v) estabilización microclimática, vi) descomposición de biomasa, vii) formación de suelos y viii) provisión de recursos hidrobiológicos (Alcorlo, 2014; Chapin III et al., 2009; Cortés y Vilarly, 2016). Los estuarios son ecosistemas de humedal que presentan variabilidad diaria y estacional de su volumen de agua, temperatura y salinidad en función de los regímenes de marea, el aporte de aguas continentales y la precipitación (Yáñez, 1978). La vegetación de los estuarios suele ser acuática o semiacuática, su fauna está compuesta principalmente por organismos marinos, estuarinos, límnicos y terrestres (Elliott et al., 2007) y la materia orgánica que en ellos se deposita puede ser alóctona o autóctona (Kristensen y Andersen, 1987). En particular, el estuario del Golfo de Urabá presenta una buena cobertura de bosque de manglar en asociación con arracachales, eneales, vegetación flotante y helechos (Thomas et al., 2007; Zamora et al., 2008).

Pese a la importancia de los estuarios como proveedores de servicios ecosistémicos, estos ecosistemas están entre los más sobreexplotados y amenazados a escala global (Barbier et al., 2011). Adicionalmente, los cambios en la cobertura vegetal y usos del suelo en sus cuencas vertientes son algunos de los factores que alteran su dinámica natural (Blanco et al., 2015). La deforestación de los bosques de manglar, la erosión costera y el aumento en el nivel del mar alteran los principales reservorios de biomasa y carbono aéreos en las zonas marino-costeras tropicales y subtropicales (Adame et al., 2013; Farnsworth y Ellison, 1998; Donato et al., 2011), lo que conduce a la liberación de grandes cantidades de carbono a la atmósfera o al océano (Alongi, 2002).

En Colombia existen cerca de 31.000.000 ha de humedales representadas por ciénagas, pantanos, turberas, lagunas y bosques inundados (Burbano et al., 2020), así como lagunas costeras, manglares y humedales costeros (Invemar, 2019). Pese a su gran extensión, las

poblaciones adyacentes a los humedales desconocen su valor ecosistémico y ejercen actividades que los impactan negativamente (Arias y Gómez, 2015). En particular, los humedales de la región de Urabá están impactados por cambios en la cobertura vegetal, principalmente asociados al establecimiento de monocultivos de banano en zonas de inundación del río León y la Ciénaga de Tumaradó, así como por la expansión de la frontera ganadera y la minería mecanizada (Aramburo et al., 2018). No obstante, también existen registros arqueológicos de cambios en la cobertura vegetal de los humedales del río León durante el periodo cálido medieval (alrededor del siglo IX A.D.), época en la que se construyeron campos elevados en su llanura aluvial con la posible intención de preservar su productividad para la pesca y la caza (Posada et al., 2023). Adicionalmente, las oscilaciones globales de la temperatura, así como los patrones de precipitación, circulación atmosférica y oceánica durante el Holoceno propiciaron cambios en el ecosistema estuarino del Golfo de Urabá relacionados con la alteración de su composición geoquímica, el aumento de sus tasas de sedimentación y de su capacidad de retención de material sedimentario (Mayewski et al., 2004; Montes y Barriga, 2021).

Las prácticas intensivas de monocultivos de banano en zonas con alta importancia ecológica han causado deterioro ambiental en los humedales de la región de Urabá. Este deterioro ha sido abordado en diferentes estudios enfocados principalmente a los efectos del uso de agroquímicos. Sin embargo, no se han considerado los impactos ecológicos asociados a la preparación del terreno, la erosión, el aporte de sedimentos a los cuerpos de agua, entre otros (Silvetti y Cáceres, 2015). Otros factores de escala global que también modifican severamente estos ecosistemas son los cambios en los patrones de circulación del océano y la deforestación (Blanco, 2016). De hecho, la reducción de la diversidad y la variación en la distribución espacial de la composición florística de varios ecosistemas han sido relacionadas con cambios en los patrones de circulación del océano, procesos de erosión y sedimentación, entre otros (Suárez y Téllez, 2014; Susan et al., 2015). Adicionalmente, los cambios en la cobertura vegetal influyen en las características funcionales de la vegetación vascular cuya cobertura disminuye tanto por variaciones en la precipitación como por la deforestación de bosques tropicales (Pérez, 2015).

En cuanto a la sedimentación, el río Atrato descarga en el Golfo de Urabá altos volúmenes de agua y partículas procedentes de la erosión de rocas y suelos (Vélez y Aguirre, 2016). Gran parte de estas partículas y material de arrastre se consolidan en el estuario como sedimentos. Estos sedimentos terrígenos se almacenan durante los periodos secos, mientras que una parte es

transportada hacia el mar por las corrientes costeras en periodos húmedos (Zeng et al., 2015; Pang et al., 2016; Liu et al., 2018). El ingreso y acumulación de este material sedimentario al Golfo, así como la descomposición de la materia orgánica, provocan afectaciones en los hábitats naturales y en la composición química de los sedimentos, lo que puede alterar los ciclos biogeoquímicos, la productividad primaria y la biodiversidad, entre otros servicios ecosistémicos del estuario (Rúa et al., 2014; Townsend et al., 2018).

Los depósitos sedimentarios que se forman en ecosistemas acuáticos por la acumulación de partículas minerales y orgánicas a lo largo del tiempo registran eventos e información sobre el pasado. Su capacidad para almacenar información paleoambiental los convierte en una herramienta útil para comprender la evolución del planeta y sus sistemas en rangos de hasta millones de años. La información paleoambiental encontrada en perfiles sedimentarios abarca desde registros climáticos y cambios ambientales hasta evidencias de actividades humanas y evolución biológica (James, 2013). Los sedimentos lacustres, marinos y fluviales, por ejemplo, capturan en sus capas estratigráficas una sucesión temporal que puede revelar patrones de sedimentación, cambios en la biodiversidad y, en algunos casos incluso la presencia de restos arqueológicos (Smol, 2010). En combinación con técnicas de datación como la de radiocarbono y el análisis de microfósiles, los depósitos sedimentarios permiten descifrar o de alguna forma reconstruir la historia de la Tierra (Yao et al., 2022).

Las altas tasas de sedimentación y la capacidad de retención de sedimentos en estuarios favorecen la preservación de constituyentes sedimentarios orgánicos que pueden convertirse en proxies o biomarcadores de cambios ambientales (Charman, 2002). Estos biomarcadores son moléculas producidas por los organismos durante la síntesis de la materia orgánica e incluyen principalmente lípidos (Li et al., 2020). A pesar de las transformaciones a las que se ven expuestos, los biomarcadores permanecen bien preservados en el registro sedimentario, conservando la estructura básica de las moléculas precursoras y almacenando información sobre clave sobre su origen y procesos de arrastre y depositación (Meyers, 2003). Dado este carácter recalcitrante, los biomarcadores son considerados fósiles moleculares que, en conjunto con la estratigrafía, resultan ser herramientas muy útiles para el estudio e interpretación de los registros sedimentarios en investigaciones paleoambientales (Quijano y Castro, 2015). El análisis de biomarcadores ha permitido dilucidar su origen (i.e. animal o vegetal), las condiciones climáticas, el régimen del caudal, la abundancia de algunas especies, las condiciones ambientales en las que

estas vivieron y se depositaron, así como las actividades antropogénicas al interior de las cuencas de drenaje (Ankit et al., 2017; Bray y Evans, 1961; Eglinton et al., 1962; Kumar et al., 2020; Li et al., 2020; Ortiz et al., 2013; Schlesinger y Bernhardt, 2013), entre otras aplicaciones.

La composición química de los biomarcadores puede variar entre lípidos, proteínas, carbohidratos, oxalatos, entre otros. Sin embargo, los compuestos solubles en disolventes orgánicos, es decir, los de origen lipídico son los más destacados (Quijano y Castro, 2015). Los hidrocarburos se encuentran entre los principales grupos de lípidos de interés geoquímico y junto a los ácidos grasos son los biomarcadores de mayor resistencia a la degradación ambiental y antrópica (Summons y Lincoln, 2012), pues permanecen inalterados incluso durante su paso a través del tracto digestivo de los organismos (Ficken et al., 1998). El contenido sedimentario de hidrocarburos es mayor al de otros biomarcadores dada su mayor estabilidad prolongada en el tiempo, por esto los hidrocarburos saturados o *n*-alcanos se consideran los principales indicadores de materia orgánica en los sedimentos (Hernández, 2018).

Los *n*-alcanos son hidrocarburos saturados de fácil identificación compuestos por cadenas lineales de átomos de hidrógeno y carbono con un rango habitual de 15 a 40 carbonos (Núñez, 2017). Estos hidrocarburos han sido usados ampliamente para inferir cambios de cobertura vegetal (Kumar et al., 2020). En las parafinas sedimentarias los alcanos con número de carbonos impar (*n*-C27, C29, C31) son más abundantes que los de número par (*n*-C28, C30). Cuando la abundancia de alcanos es mayor en *n*-C17, su origen es predominantemente fitoplanctónico (Correa, 1996), mientras que los *n*-alcanos que se encuentran en la cera de plantas terrestres presentan mayores contenidos de *n*-C29 a C33 y en plantas acuáticas de *n*-C21 a C25, lo que permite valorar las contribuciones de algas, macrófitas acuáticas y plantas terrestres a la materia orgánica sedimentaria en zonas costeras y estuarios (Eglinton y Hamilton, 1967). En estas zonas, es particular encontrar material orgánico asociado a plantas herbáceas de aguas salobres o eneales de ambientes dulceacuícolas, así como plantas terrestres superiores, grupo principal encargado de sintetizar los hidrocarburos a partir de sus ceras epicuticulares (Liebezeit et al., 2014).

El análisis de la abundancia de la relación entre las longitudes dominantes de cadena de *n*-alcanos y los *n*-alcanos totales permite la cuantificación del aporte terrestre versus la producción acuática en estuarios (Li et al., 2020). Adicionalmente, los índices basados en la relación entre niveles sedimentarios de *n*-alcanos como el índice de abundancia de macrófitas, el de longitud media de la cadena o el de preferencia de carbono, entre muchos otros, revelan información

paleoambiental que permite inferir los cambios y aportes de material vegetal a los sedimentos estuarinos. Investigaciones con este enfoque no han sido realizadas en ecosistemas costeros en Colombia, aunque se sabe que los deltas son geoformas de interés para estudiar registros geológicos relacionados con oscilaciones del nivel del mar y cambios ambientales, especialmente los que ocurrieron en el Holoceno (Mateo y Siringan, 2016, Korus y Fielding, 2015, Maselli et al., 2014).

Dada la importancia ecosistémica del Golfo de Urabá y del delta del río Atrato, así como su ubicación estratégica, es posible que en este se encuentren registros de los cambios en la cobertura terrestre que se han presentado durante los últimos 1000 años. Por esta razón, este estudio busca contribuir a la generación de nuevo conocimiento sobre los cambios de la cobertura vegetal del Golfo de Urabá durante los últimos 1000 años, a partir de la determinación de la distribución de los n-alcanos presentes en un perfil sedimentario del Golfo, del análisis de algunos índices de n-alcanos, así como de las fuentes de origen de la materia orgánica.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Reconstruir el cambio sucesional de la vegetación en el sistema estuarino del Golfo de Urabá a través del análisis de biomarcadores de *n*-alcanos presentes en un perfil sedimentario deltaico.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la distribución de *n*-alcanos presentes un perfil sedimentario recuperado en el frente deltaico del río Atrato.
- Analizar la variación de los índices de *n*-alcanos en el perfil sedimentario recuperado en el frente deltaico del río Atrato.
- Establecer los cambios en las fuentes de origen de la materia orgánica depositada en el frente deltaico del río Atrato a partir de las fracciones *n*-alcanos registradas en el sedimento.

3. Pregunta de investigación

¿Cuál es la relación entre la distribución vertical de *n*-alcanos y el proceso sucesional de la vegetación en la cuenca del Golfo de Urabá durante los últimos 1000 años?

4. Hipótesis

Si la variación del contenido de hidrocarburos en el perfil sedimentario del Golfo de Urabá depende de la sucesión de la vegetación y de las condiciones climáticas, entonces la señal de *n*-alcanos durante periodos húmedos reflejará mayores aportes de materia orgánica al sedimento proveniente del arrastre y descomposición de las plantas vasculares terrestres. En contraste, cuando las condiciones predominantes sean secas la señal de *n*-alcanos indicará mayores aportes de vegetación acuática.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El Golfo de Urabá está ubicado en el extremo suroccidental del Caribe colombiano (Figura 1), con latitudes 7°54' - 8°40'N y longitudes 76°56' - 77°23'W, con climas que varían de tropical seco al noreste, a tropical húmedo al oriente y temperaturas entre 26 y 28°C. El estuario es un cuerpo de agua semicerrado, de aproximadamente 80 km de longitud, 25km de ancho, profundidad media de 25m y máxima de 60m (CORPOURABÁ, 2003; Bernal et al., 2005) La precipitación media anual se estima en 2500 mm y cambia anualmente durante dos épocas climáticas: época seca entre diciembre - abril y húmeda de mayo a noviembre. Estos cambios en precipitación dependen de la oscilación anual de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y de los vientos alisios del noroeste (Chevillot et al., 1993).

Las corrientes superficiales fluyen en el Golfo en temporada húmeda, cuando los vientos arrastran las aguas salobres por todo el costado nororiental generando dos vórtices en la boca Leoncito del río Atrato, que facilitan la dispersión de la pluma del río Atrato (Montoya y Toro, 2006). En época seca, los vientos confinan la descarga fluvial del Atrato, induciendo una contracorriente lenta en dirección sur norte a 4 m de profundidad, ocasionado allí una disminución en la salinidad (Molina et al., 1992). El estuario está dominado por mareas de baja energía facilitando la deposición de lodos formados de marisma y manglares (Rúa et al., 2014). Gran parte del Golfo es un ambiente de depósito que registra aumento en la erosión y transporte de lutitas fisionables por altas precipitaciones río abajo (Correa y Alcántara, 2005). Los cambios en la vegetación original por el monocultivo de plátano o banano (*Musa sp.*), incrementan las tasas de erosión en la cuenca drenada por el río León (Thomas et al., 2007, Blanco, 2009).

El Delta del río Atrato se ubica el margen occidental del Golfo de Urabá, en una zona alimentada por el tercer sistema fluvial más grande de Colombia, el río Atrato, que tiene una superficie de 38.000 km² con más de 150 afluentes, un caudal medio de 2740 m³/s y una descarga sustancial de sedimentos de 11,26 x 10⁶ ton/año (Álvarez y Bernal, 2007; Betancur et al., 2020; Velásquez y Poveda, 2016). En esta zona se encuentra la mayor extensión de bosque de manglar

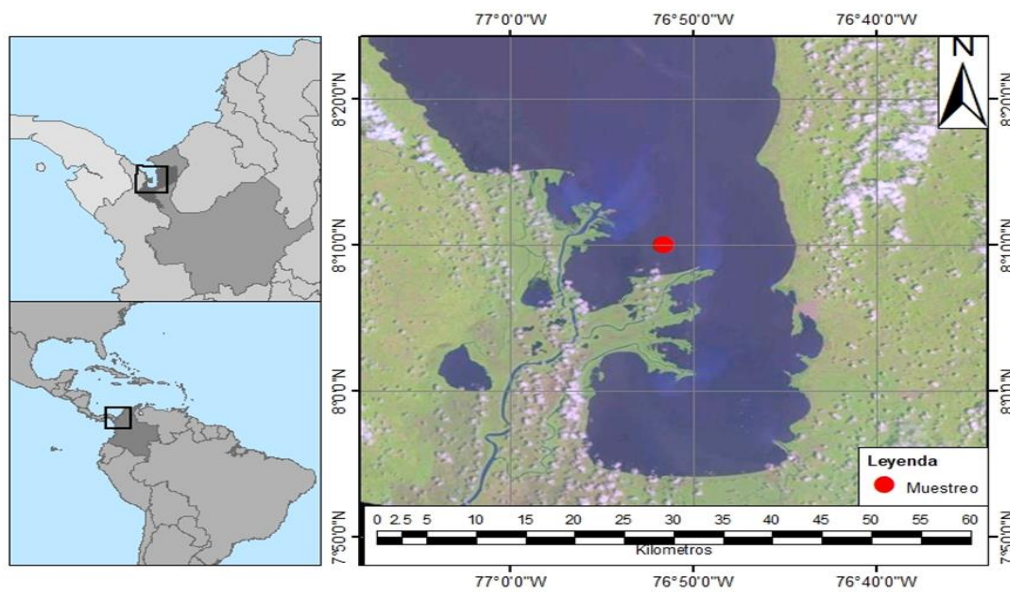
del Golfo, principalmente de las especies *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa*, y *Avicennia germinans*, a las cuales se asocian arracachales (*Montrichardia arborescens*), eneaes (*Typha domingensis*), vegetación flotante (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Lemna minor*) y helechos (*Acrostichum aureum*) (Thomas et al., 2007; INVEMAR, 2019).

3.2 Trabajo en Campo

Para la extracción del núcleo de sedimento se utilizó un nucleador de gravedad provisto de un pistón y un tubo de polivinilo de 6,3 cm de diámetro en su interior. El nucleador usado estuvo acoplado al mástil del Buque B/V ARC-Quindío en el crucero oceanográfico realizado en diciembre del 2009. El perfil sedimentario extraído durante dicha campaña de muestreo fue denominado SP26 (Rúa et al., 2014) y es el analizado en esta investigación. La longitud del núcleo de sedimento recuperado fue de 2,0 metros y se extrajo del frente deltaico del río Atrato (Figura 1). Posteriormente, el núcleo sedimentario fue transportado al laboratorio donde se almacenó a una temperatura de 4°C. El núcleo se cortó cada 5 cm para un total de 40 muestras litológicas, las cuales fueron liofilizadas durante 24 horas y molidas en un molino de bolas de ágata a 200 rpm durante 30 min (Liebezeit y Wöstmann, 2009).

Figura 1

Ubicación geográfica del Golfo de Urabá y del sitio de muestreo en el Frente deltaico del río Atrato



3.3 Preparación de extractos

Los lípidos sedimentarios totales se extrajeron utilizando 200 ml de una mezcla de diclorometano/metanol (90:10 v/v) durante 24 h en extracción Soxhlet. Los extractos se evaporaron a 1 ml en un rotavapor. El bitumen fue separado mediante el uso de un embudo empacado con Na_2SO_4 y posterior adición de 20 ml de la misma mezcla de diclorometano/metanol. El bitumen fue nuevamente rotovaporado a 1 ml. Los *n*-alcanos fueron separados del bitumen usando columnas cromatográficas de vidrio de 1 cm de diámetro y 20 cm de longitud, empacadas con sílica gel activada. Se agregó además aproximadamente 1 cm de Na_2SO_4 en el techo de la columna empacada para retener la humedad. Finalmente, se adicionó el extracto de bitumen para su elución en la columna cromatográfica usando 15 ml de *n*-hexano y el escualeno como estándar interno (Liebezeit y Wöstmann, 2009).

3.4 Determinación de hidrocarburos y cronología

Los *n*-alcanos de cadena larga (C16-39) se analizaron con un cromatógrafo de gases acoplado a masas (GC-MS) con columna capilar J&W DB 5. El cromatógrafo fue programado con una rampa de calentamiento desde 60 hasta 300°C a una tasa de 6°C/min. Esta temperatura de 300°C fue mantenida durante 30 min. Se usó He como gas portador, con un flujo de 1,2 mL/min. Los *n*-alcanos individuales se identificaron basándose en el tiempo de retención de los estándares auténticos (Sigma Aldrich) (Liebezeit y Wöstmann, 2009).

3.5 Estratigrafía y cronología

La descripción de la estratigrafía del perfil sedimentario SP26 extraído del frente deltaico del río Atrato se realizó a partir de los resultados de Rúa y colaboradores (2016). La edad de tres estratos del perfil fue inferida a partir del aumento del factor de enriquecimiento (FE) por mercurio (Hg) y no usando radiocronología. Según Rúa et al., (2014), el ascenso del nivel preindustrial de Hg sedimentario entre FE = 1,0 a FE = 1,5 en la porción superior del perfil corresponde a los años 1555 y 1811 AD, de conformidad con la historia de extracción de oro y plata en Centro y Sur América (Bethell, 1884). Hacia la base del perfil, el único salto abrupto en

el nivel de Hg marca la fecha de la erupción cataclísmica del volcán El Chichón durante la época preindustrial (Global Volcanism Program, 2016). Las edades y tasas de sedimentación propuestas por Rúa et al., (2014) concuerdan con el análisis más reciente de cronología por luminiscencia realizado en el frente deltaico por Betancurth y colaboradores (2020), lo que indica que estas edades pueden usarse para la datación del núcleo.

3.6 Determinación de índices de n-alcanos

Para obtener información sobre el origen de la materia orgánica (i.e. terrestre, acuático o algal) contenida en sedimentos se utilizan diversos índices calculados a partir del contenido de n-alcanos (Ficken et al., 1998). Estos índices, además permiten dilucidar sobre las características y condiciones ambientales a las cuales fueron expuestos los organismos (Hernández, 2018). Los índices de n-alcanos determinados estudio fueron:

Relación terrígenos-acuáticos (TAR): Proporciona el valor de diferenciación entre las fuentes de vegetación, terrestres y acuáticas (Cranwell, 1973), se calcula a partir de la ecuación:

$$TAR = (C_{27} + C_{29} + C_{31}) / (C_{15} + C_{17} + C_{19})$$

Índice de abundancia de macrófitas (Paq): Es un índice propuesto por Ficken et al., (2000) a partir de las características de las macrófitas acuáticas, como forma de valorar el aporte de uno u otro tipo de macrófitas acuáticas al sedimento. Mide la abundancia relativa de las cadenas de 23 y 25 átomos de carbono, características de macrófitas flotantes y subacuáticas, frente a las cadenas de 29 y 31 carbonos, características de plantas terrestres (Hernández, 2018). El índice Paq se calcula con la siguiente ecuación:

$$Paq = (C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$$

Longitud media de cadena (ACL): Proporciona información sobre el origen de la materia orgánica ya que tiene en cuenta la distribución de todos los alcanos presentes en las muestras, discriminando entre el predominio de n-alcanos de peso molecular bajo y alto expresado como la media de la longitud de cadena (Hernández, 2018).

$$\left[\frac{(\sum(C_i x_i + C_{i+1} x(i+1) + C_{i+2} x(i+2) \dots + C_n x n))}{\sum C_{n+1} + C_{n+2} + \dots + C_n}, \text{ con } i = 23, n = 33 \right]$$

donde x = concentración

Índice de preferencia de carbono (CPI): Representa la predominancia de cadenas impares sobre pares en un rango determinado de cadenas de alcanos. Empleado también como indicador de la preservación de la materia orgánica de determinado rango de cadenas. (Hernández, 2018).

$$CPI = \frac{1}{2} [(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32}) \\ + (C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}) / (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})]$$

En la tabla 1 se presentan interpretaciones dadas en la literatura a valores característicos de los índices de n-alcanos utilizados en este estudio.

Tabla 1

Índices de n-alcanos comúnmente utilizados en estudios previos para identificar las fuentes de materia orgánica en los sedimentos (Modificada de Liu et al. 2020).

Índice	Valor	Fuente	Referencias
TAR	TAR > 4	Terrígena	Silliman et al. (1996),
	TAR < 1	Acuática	Ortiz et al. (2013)
Paq	Paq = 0.01–0.25	Plantas terrestres	Ficken et al. (2000),
	Paq = 0.4–0.6	Planta acuática emergente	Sikes et al. (2009)
	Paq > 0.6	Planta acuática sumergida	
ACL	ALC ≈ 28	Petrogénica	Tareq et al. (2005),
	ALC ≈ 29	Marina	Jeng (2006), Fang et al.
	ALC ≈ 30	Cera vegetal	(2014)
CPI	CPI = 5–10	Terrestre	Rieley et al. (1991a),
	CPI ≈ 1	Petrogénica o Marina	Kennicutt et al. (1987)

3.7 Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo para determinar los principales estadísticos de tendencia central, dispersión y forma de cada uno de los índices de n-alcanos (CPI, ACL, TAR y Paq). Posteriormente, se usaron las pruebas de Shapiro-Wilk y de Levene, para evaluar normalidad de los datos y homocedasticidad de las varianzas, respectivamente. Dado que ambas pruebas fueron significativas ($p < 0,05$) se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis seguida de la prueba de Dunn con ajuste de Bonferroni, para evaluar diferencias estadísticamente significativas en los índices de n-alcanos entre tres periodos climáticos a saber: Período cálido actual (CWP, por sus siglas en inglés), Pequeña edad de hielo (LIA, por sus siglas en inglés) y Periodo cálido medieval (MWP, por sus siglas en inglés). Finalmente, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman para evaluar correlaciones estadísticamente significativas entre índices de n-alcanos y la edad. Todos los análisis se realizaron con el software IBM SPSS Statistics-29.

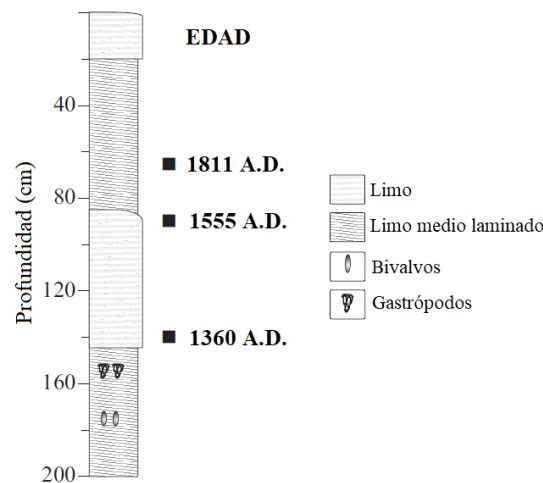
4. Resultados

4.1 Estratigrafía y cronología

En el frente deltaico del río Atrato, el perfil sedimentario extraído se caracterizó por un color gris verdoso oscuro (56Y-4/1) y enriquecimiento de materiales finos con pocos fragmentos biológicos gruesos y finos de conchas de bivalvos y gastrópodos (Figura 2). El perfil presentó alternancia de limo y limo medio laminado desde la base hasta el techo. El momento de transición del estrato de limo medio laminado en la base del perfil a limo en el estrato suprayacente coincidió aproximadamente con la erupción del volcán mexicano El Chichón en 1360 AD. Entre 1360 y 1555 AD, se observó un aumento en la granulometría en un estrato dominado por limo. Este último estrato subyacía otro de limo medio de aproximadamente 70 cm de espesor que estaba en contacto con limo en el techo del perfil (Rúa et al., 2016).

Figura 2

Estratigrafía y edad del perfil sedimentario del frente deltaico del río Atrato (Modificado de Rúa et al., 2016)



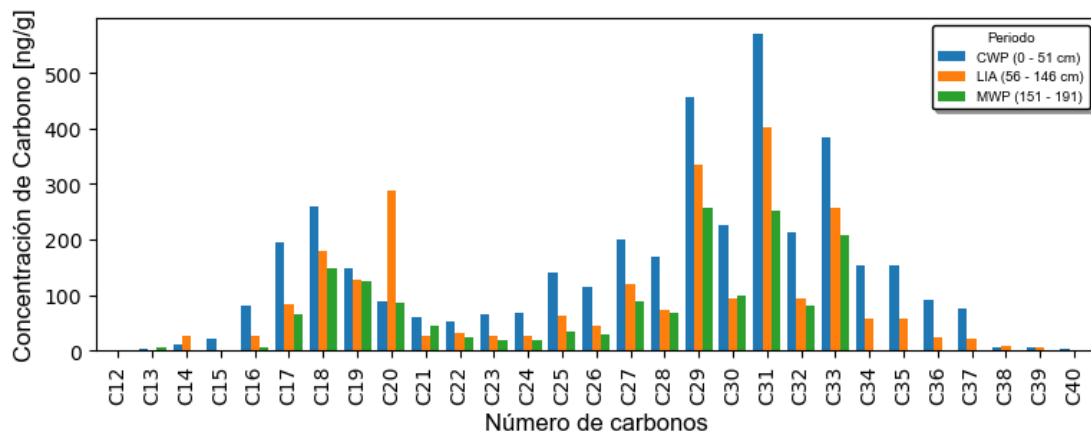
4.2 n-alcenos

Se identificaron un total de 28 *n*-alcenos en el rango C13 a C40 (Figura 3), con concentraciones entre 0 y 2726,65 ng/g. En todas las profundidades se observan dos grupos

predominantes de hidrocarburos, el primero con *n*-alcanos de cadena corta principalmente de C17 – C20. En el segundo grupo predominan los *n*-alcanos de cadena larga (C29 – C33), especialmente los compuestos impares C29, C31 y C33. En los 3 rangos de profundidad (0 a 51, 56 a 146 y 151 a 191 cm) existe una predominancia de C29 y C31. La concentración de C31 es mayor que la de C29 en las profundidades de 0 – 51 cm y 56 – 146 cm y menor en el rango de profundidad de 151 cm – 191 cm. Las mayores concentraciones medias de *n*-alcanos se encontraron entre 0 – 51 cm, con representatividad de todos los 28 compuestos identificados. Los hidrocarburos de cadenas superiores a C33 no fueron detectados a profundidades mayores de 100 cm.

Figura 3

Concentraciones medias de n-alcanos en tres rangos de profundidad del perfil sedimentario del frente Deltaico del río Atrato



4.3 Índices de n-alcanos

El índice TAR osciló entre 1,47 y 21,74 con promedio de $4,60 \pm 3,62$ (Tabla 2). Este índice fue mayor entre 56 – 146 cm con un valor de $5,98 \pm 4,69$, en comparación con el medido entre 0 – 51 cm y 151 – 191 cm, donde alcanzó valores comparables de $3,43 \pm 1,44$ y $3,09 \pm 0,94$, respectivamente (Figura 4a). Los valores máximos locales del índice TAR encontrados entre 56 – 146 cm fueron 14,36 y 21,74, mientras que el TAR más bajo (1,47) se registró a 86 cm. El

coeficiente de variación del índice TAR fue alto (79,4%) y los coeficientes de asimetría y curtosis indican que los datos se alejan considerablemente de la distribución normal.

El índice Paq osciló alrededor de $0,11 \pm 0,09$, en un rango estrecho entre 0,0 – 0,29 y presentó el mayor coeficiente de variación (81,8%, Tabla 2). Los mayores valores del Paq se encontraron en el techo del núcleo entre 0 – 51 cm con un promedio de $0,16 \pm 0,03$. Los valores promedio del Paq fueron menores entre 56 – 146 cm y 151 – 191 cm de profundidad, con valores de $0,08 \pm 0,08$ y $0,08 \pm 0,11$, respectivamente (Figura 4b). El valor 0,00 en el índice Paq registrado por debajo de 101 cm corresponde a la ausencia de hidrocarburos de cadenas C23 y C25 a ciertas profundidades, lo cual influyó en los bajos promedios indicados anteriormente. Los máximos locales del Paq fueron 0,27 a 51 cm y 0,29 a 156 cm.

Tabla 2

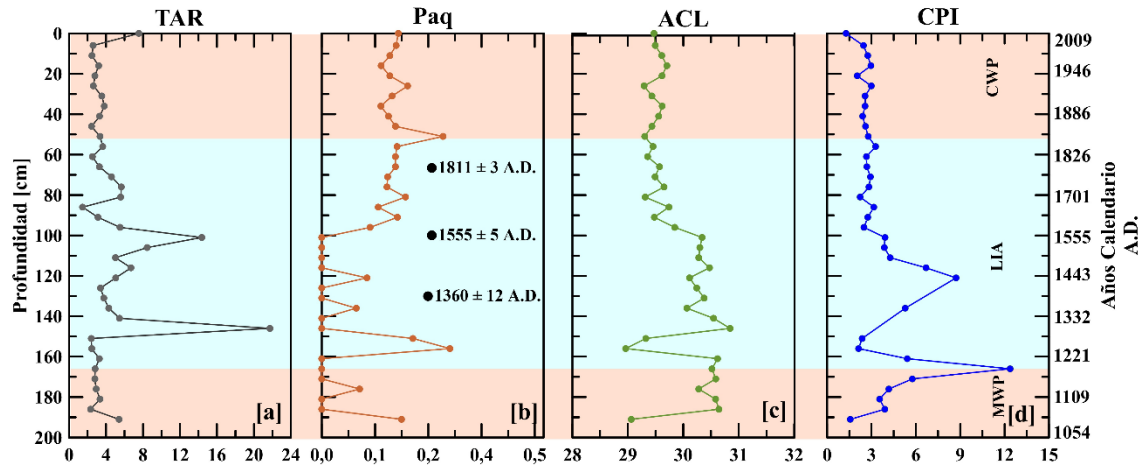
Estadísticos descriptivos de los índices de n-alcános registrados en el perfil sedimentario del Frente deltaico del río Atrato.

Índice	n	Rango	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Asimetría	Curtosis
TAR	39	20,27	1,47	21,74	4,60	3,62	79,4	3,47	14,06
Paq	39	0,29	0,00	0,29	0,11	0,09	81,8	-0,04	-1,04
ACL	39	1,88	28,96	30,84	29,86	0,52	1,7	0,28	-1,26
CPI	35	11,10	1,27	12,37	3,61	2,14	59,3	2,59	8,15

Por su parte, el índice ACL fue estable con una variación de sólo 1,7% y rango entre 28,96 a 156 cm y 30,84 a 146 cm y un promedio de $29,86 \pm 0,52$ (Tabla 2). El ACL registró valores más bajos entre 0 – 51 cm ($29,5 \pm 0,12$) que entre 56 – 146 cm ($29,97 \pm 0,46$) y 151 – 191 cm ($30,06 \pm 0,72$, Figura 4c). Finalmente, el índice CPI fue de $3,61 \pm 2,14$ y, al igual que los índices TAR y ACL, registró valores más bajos entre 0 – 51 cm ($2,49 \pm 0,48$). El CPI aumentó entre 56 – 146 cm a valores de $3,85 \pm 1,80$ y aumentó nuevamente a $4,58 \pm 3,25$ en la base del perfil (Figura 4d). Este índice no fue calculado a las profundidades 126, 131, 141 y 146 cm debido a la ausencia de cadenas pares de 24 a 32 carbonos en dichas muestras.

Figura 4

Índices de n-alcenos para el perfil sedimentario del frente Deltaico del río Atrato: [a]: TAR; [b]: Paq; [c]: ACL; [d]: CPI.

**4.4 Comparación de índices entre periodos climáticos**

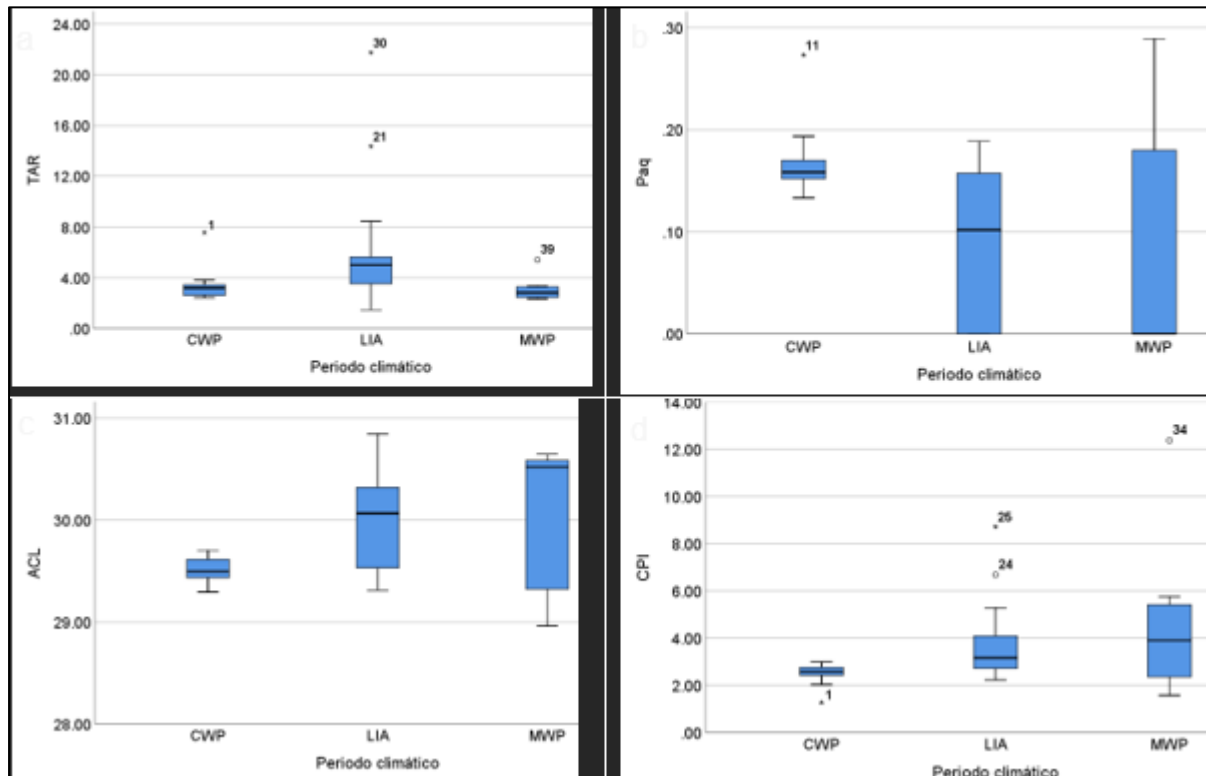
Dado que la prueba de Shapiro Wilk indicó que no hay normalidad ($p < 0,05$) en los datos de ninguno de los índices de n-alcenos y que la prueba de Levene indicó que las varianzas en los grupos no son homogéneas ($p < 0,05$), se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para evaluar si existían diferencias en los índices de n-alcenos en 3 periodos climáticos a saber: Periodo cálido actual (CWP, correspondiente a la edad 1850 A.D. al presente y registrado entre 0 y 51 cm de profundidad); Pequeña edad de hielo (LIA, correspondiente a la edad 1300 A.D. hasta 1850 A.D. y registrada entre 56 y 146 cm de profundidad) y Periodo cálido medieval (MWP, correspondiente a la edad 800 A.D hasta 1300 A.D, y registrado entre 151 y 191 cm de profundidad).

La prueba de Kruskal-Wallis para los cuatro índices fue significativa, con valores $p < 0,05$ para los índices Paq, ACL y CPI y $p < 0,001$ para el índice TAR. La prueba de Dunn reveló que el índice TAR en LIA fue estadísticamente diferente y mayor al registrado en los periodos cálidos CWP y MWP, los cuales no presentaron diferencias entre ellos (Figura 5a). Por su parte, el índice Paq fue estadísticamente diferente y menor en LIA respecto a CWP (Figura 5b). Para el caso de

los índice ACL y CPI, ambos fueron diferentes y menores en CWP respecto a los obtenidos en LIA y MWP (Figura 5c y 5d).

Figura 5

Diagramas de cajas y bigotes para los índices de *n*-alcanos del perfil sedimentario del frente Deltaico del río Atrato.



4.5 Correlaciones

Las correlaciones entre los índices Paq, ACL y CPI fueron altas (74,6-95,6%). El Paq mostró correlación inversa con ACL y CPI, mientras que la correlación fue directa entre ACL y CPI. Las correlaciones entre la edad del perfil sedimentario y estos tres índices fueron medias (48 - 51,2%) e indicaron correlación directa con el índice Paq e inversa con los índices ACL y CPI (Tabla 3 y Figura 6). Por su parte, TAR fue el único índice que no tuvo correlación significativa con los demás índices ni con la edad del perfil sedimentario.

Tabla 3

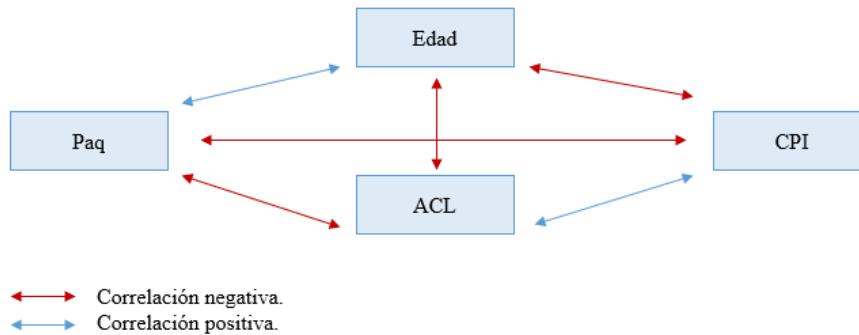
Coefficiente Rho de Spearman entre los índices de n-alcenos y la edad del perfil sedimentario del frente Deltaico del río Atrato.

	TAR	Paq	ACL	CPI	Edad
TAR	1,000	-0,299	0,240	0,095	-0,054
Paq	-0,299	1,000	-0,956**	-0,759**	0,496**
ACL	0,240	-0,956**	1,000	0,746**	-0,512**
CPI	0,095	-0,759**	0,746**	1,000	-0,480**
Edad	-0,054	0,496**	-0,512**	-0,480**	1,000

** correlación significativa al 99% ($p < 0,01$)

Figura 6

Representación esquemática de las correlaciones entre índices de n-alcenos y la edad del perfil sedimentario del frente Deltaico del río Atrato.



5. Discusión

La longitud de la cadena de los hidrocarburos medidos en el perfil sedimentario del frente Deltaico del río Atrato varió entre C13 y C40, con proporciones y concentraciones que sugieren diversas fuentes de materia orgánica preservada en el estuario (Kumar et al., 2020), así como, exposición de los sedimentos y la materia orgánica a condiciones climáticas variables (Seki et al., 2010).

En el CWP (1856 A.D. al 2009 y 0-51 cm de profundidad) las concentraciones de *n*-alcanos fueron más altas que las medidas en los otros periodos climáticos, lo que indica incremento en el aporte de materia orgánica en el periodo reciente. A lo largo de todo el perfil sedimentario predominaron los *n*-alcanos de cadena larga C29 a C33, característicos de ceras de plantas terrestres (Ankit et al., 2017). Las concentraciones máximas en C27 o C29 indican aportes de materia orgánica proveniente de árboles y arbustos, mientras que las máximas en C31 o C33 aportes de gramíneas (Cranwell, 1973; Liu et al., 2020; Zech et al., 2013). Estas altas concentraciones se mantuvieron hasta los 56 cm de profundidad (durante el CWP), sin embargo, se registró un pico de C31 en la LIA (cerca al año 1596 A.D y a 96 cm de profundidad) que puede atribuirse a una respuesta adaptativa de las plantas, las cuales aumentaron la producción de su cera foliar en respuesta a condiciones frías y secas, bajo las cuales estuvieron sometidas durante este periodo climático (Hoffmann et al., 2013).

A lo largo del perfil sedimentario también se registraron hidrocarburos de cadena corta C17, C18 (con concentraciones más altas en el CWP), C19 (con concentraciones similares en los tres periodos climáticos y C20 (con concentraciones mayores en la LIA, 1304 a 1841 A.D. y 56-146 cm de profundidad), aunque con menor concentración que los de cadena larga. Estos registros de *n*-alcanos C18 y C20, corresponden al aporte de materia orgánica proveniente de fitoplancton, zooplancton y bacterias (Liu et al., 2020; Meyers, 2003, Shen et al., 2019). Los hidrocarburos de cadena media de C21 a C25, correspondientes a aportes de macrófitas acuáticas sumergidas y flotantes (Ficken et al., 2000), también presentaron mayores concentraciones en el CWP, aunque en muy baja proporción, en relación a los de cadena larga o corta.

La variabilidad observada en los valores del CPI permite diferenciar entre dos fuentes principales de materia orgánica al perfil sedimentario del frente deltaico, vegetación acuática y vegetación terrestre. Los valores cercanos a 3 hallados en el CWP y en la LIA hasta el año 1592 A.D. (a 96 cm de profundidad) indican aportes predominantes de vegetación acuática, mientras que valores superiores a 5 encontrados en la LIA (de 1360 a 1472 A.D. y entre 116 y 136 cm de profundidad) y en el MWP (de 1165 a 1221 A.D. y entre 161 y 171 cm de profundidad), son característicos de plantas superiores terrestres (Herrera, et al., 2020, Bray y Evans, 1961; Cui et al., 2008). Adicionalmente, los valores de CPI cercanos a 1 en la base y en el techo del perfil son el resultado de la depositación y posterior respiración de materia orgánica original proveniente de vegetación terrestre y acuática que persiste como alcanos de cadena larga y de cadena corta, respectivamente (Herrera, et al., 2020; Bray y Evans, 1961; Eglinton y Hamilton, 1967). Inicialmente la materia orgánica de origen terrestre se depositó en el sedimento y con el tiempo los procesos microbianos y químicos actuaron en su descomposición, lo que reduce la proporción de alcanos de cadena larga y aumenta la de alcanos cadena corta, resultando en valores de CPI bajos. Sin embargo, la superposición de los rangos de CPI a diferentes profundidades especialmente en los primeros 96 cm (durante el CWP y parte de la LIA), no permite ser concluyente con relación a la separación entre plantas terrestres y macrófitas acuáticas, por lo que se hace necesario utilizar la información entregada por los demás índices evaluados en este estudio.

El CPI también permite establecer tentativamente una relación entre un periodo o evento climático y los cambios en el tipo de vegetación presente. Los valores de CPI cercanos a 1 del techo y la base del perfil del frente deltaico del río Atrato podrían indicar una mayor degradación de la materia orgánica en el sedimento, probablemente debido a la exposición aérea del sedimento o a condiciones más cálidas y húmedas en los periodos CWP y MWP. En contraste, los valores elevados de CPI registrados desde 101 hasta 176 cm de profundidad sugieren que la materia orgánica se ha preservado en el sedimento y ha sufrido bajos niveles de degradación con respecto al tiempo, posiblemente favorecidos por la transición de los periodos MWP a LIA y las condiciones frías y secas, predominantes en este último periodo (Eglinton y Hamilton, 1967; Rielley et al., 1991). En este sentido, Rao y colaboradores (2009) hallaron una tendencia de valores bajos de CPI en periodos interglaciares más cálidos y húmedos, contrastando con CPI

altos durante condiciones más frías y secas, lo que sugiere una influencia climática en la composición de la vegetación que se depositó posteriormente en el sedimento del frente deltaico del río Atrato, así como aportes mayores de vegetación terrestre en condiciones climáticas más frías y de vegetación acuática en los periodos más cálidos.

Los valores bajos de Paq sugieren una composición compleja y heterogénea de la materia orgánica depositada en el sedimento del frente deltaico del río Atrato. Paq entre 0,1 y 0,3, registrados durante el CWP y la LIA hasta el año 1592 A.D. (a 96 cm de profundidad), indican una mezcla de aportes de macrófitas emergentes, establecidas en los sitios de transición entre el ambiente terrestre y acuático, con macrófitas flotantes que transporta el río Atrato. Por su parte, Paq menores a 0,1 registrados en la LIA entre 1304 y 1555 A.D. (de 101 a 146 cm de profundidad) indican una influencia significativa de aportes de vegetación terrestre al sedimento (Ficken et al., 2000; Li et al., 2020b). Estos resultados son consistentes con lo indicado para el CPI y ACL. El valor promedio del índice Paq indica que el origen de la vegetación acuática en el sedimento corresponde a macrófitas emergentes. Sin embargo, este promedio se ve altamente influenciado por datos en los cuales el índice Paq tomó valores de 0, principalmente a profundidades mayores a 96 cm. En estos casos hay ausencia de cadenas de *n*-alcanos C23 y C25, características de macrófitas emergentes (Ficken et al., 2000) y predominancia de las cadenas C29 y C31, que corresponden a plantas terrestres (Ankit et al., 2017).

El ACL del perfil sedimentario del Golfo de Urabá da cuenta de una mezcla de fuentes de materia orgánica terrestre y acuática en los sedimentos (Santana et al., 2023), tal como lo sugieren los demás índices de *n*-alcanos determinados en este estudio. El ACL registrado durante el MWP (1053 a 1276 A.D. y 151-191 cm de profundidad) indica aportes de materia orgánica terrestre que persisten hasta mediados de la LIA (1555 A.D. y 101 cm de profundidad), periodo en el cual se redujo el aporte fluvial por la prevalencia de condiciones secas. De manera que la persistencia de valores de ACL alrededor de 30 hasta avanzada la LIA responde al aumento en la producción de cera foliar como mecanismo de adaptación de las plantas superiores a las condiciones predominantes en ese periodo (Hoffmann et al., 2013).

Entre 1592 y 2009 A.D. (Desde el techo del perfil hasta los 96 cm de profundidad) se reduce el ACL, coincidiendo con valores mayores de Paq, lo que indica una contribución significativa de macrófitas sumergidas desde mediados de la LIA y durante el CWP (Sun et al., 2013). Esta vegetación acuática se desarrolla en regiones costeras con ambientes cálidos y alta producción de nutrientes (Santana et al., 2023). Posiblemente, el aumento de la temperatura y la precipitación en el CWP y la intensificación de actividades agrícolas en el periodo reciente (Posada et al., 2023), han provocado el aumento en la concentración de nutrientes y, dadas las condiciones climáticas más cálidas, se incrementó así el crecimiento de macrófitas y su posterior depositación en el perfil sedimentario del Golfo. De otro lado, los valores predominantes de ACL en el CWP pueden también provenir de plantas tipo C3 como manglares de las especies *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa* (Santana et al., 2023).

El TAR a lo largo del perfil sedimentario del Golfo de Urabá presentó valores predominantes entre 2 y 6, con valores superiores a 4 en la primera mitad de la LIA (1304-1555 A.D. y 101-146 cm de profundidad). Esto indica un mayor aporte de plantas terrestres en la materia orgánica del sedimento durante esta parte del periodo de enfriamiento regional (LIA) o como se indicó anteriormente, mayor producción de cera foliar de las plantas terrestres (Yu et al., 2016; Ankit et al., 2017). El TAR particularmente alto registrado en 1304 A.D. (146 cm de profundidad) podría estar asociado a un marcado proceso erosivo y excesivo ingreso de material terrestre (Camacho, 2018). Este pico también fue observado en el índice ACL, lo que además sugiere mayor producción y diferencias en la composición de la cera foliar de las plantas terrestres, como respuesta a las condiciones hidroclimáticas (Hoffmann et al., 2013). Durante el CWP la reducción del TAR, que coincide con el aumento del Paq, podría atribuirse a una mayor producción primaria por el fitoplancton estuarino (Ankit et al., 2017; Santana et al., 2023).

Los contenidos de n-alcanos indican que los mayores aportes de materia orgánica al frente deltaico del río Atrato en el golfo de Urabá provienen de plantas terrestres. Lo anterior cobra sentido considerando que el río Atrato aporta la mayor proporción de sedimentos al golfo y que ingresa luego de drenar la selva del Chocó biogeográfico. Sin embargo, considerando la hidrodinámica del golfo descrita por Montoya y Toro (2006) y Thomas y colaboradores (2007), para poder generalizar los resultados a todo el golfo de Urabá sería necesario hacer análisis de n-

alcanos en otros sitios, dado que probablemente en lugares con menor influencia del frente deltaico del río Atrato y en el prodelta los contenidos de n-alcanos, así como los índices calculados a partir de estos, exhibirían valores diferentes.

Finalmente, los índices de n-alcanos determinados en este estudio sugieren un aporte heterogéneo de materia orgánica al sedimento del frente deltaico del río Atrato, compuesta principalmente por vegetación terrestre y en menor proporción por vegetación acuática. No obstante, para precisar las proporciones correspondientes a cada tipo de vegetación es necesario complementar este estudio con análisis de la composición de n-alcanos en la vegetación dominante del área de influencia del golfo de Urabá. Esto considerando que a pesar que el contenido de n-alcanos en plantas terrestres es mayor en C29 a C33 (Eglinton y Hamilton, 1967), también los n-alcanos de algunas macrófitas acuáticas tienen distribuciones similares a los de las plantas terrestres con concentraciones máximas en C27 y C29 (Cranwell, 1973; Ficken et al., 2000) y que los contenidos de n-alcanos máximos en C31 también se reportan para vegetación de humedales y gramíneas (Ficken et al., 1998).

6. Conclusiones

Los sedimentos del frente deltaico del río Atrato en Golfo de Urabá, han recibido aportes significativos de materia orgánica en los últimos 1000 años. El origen de esta materia orgánica es biogénico y sus fuentes principales son plantas terrestres y macrófitas acuáticas. La distribución de n-alcenos y sus índices de n-alcenos TAR, ACL y CPI revelaron que durante el último milenio el mayor aporte provino de vegetación terrestre, mezclado con una menor proporción de materia orgánica de la vegetación acuática.

El índice Paq confirmó la composición heterogénea de la materia orgánica y la influencia de diferentes tipos de vegetación (macrófitas acuáticas y vegetación terrestre) en los sedimentos del frente deltaico del río Atrato. A pesar de que el Paq sugiere una mezcla de macrófitas emergentes y flotantes durante el CWP y la segunda mitad de la LIA, también indica el aporte de vegetación terrestre durante todo el periodo de estudio.

A la luz de los eventos paleoclimáticos del Holoceno tardío, las fuentes de materia orgánica al sedimento experimentaron cambios que fueron registrados por la señal de n-alcenos en el perfil sedimentario. Durante el CWP la concentración de n-alcenos fue mucho mayor que en la LIA o el MWP, lo que evidencia mayor ingreso de materia orgánica en este periodo, posiblemente asociado con altos niveles de precipitación y mayor influencia antrópica. De otro lado, el aumento de los índices de n-alcenos durante la LIA sugiere que las plantas vasculares terrestres, aumentaron la producción y composición de su cera foliar para adaptarse a las condiciones climáticas frías y secas de este periodo.

7. Recomendaciones

Este estudio recomienda determinar la distribución de n-alcános y sus índices de n-alcános en diferentes sitios del Golfo de Urabá, de manera que se pueda analizar el ingreso de materia orgánica a través de otras fuentes diferentes al río Atrato. Adicionalmente, realizar estudios de la composición de n-alcános en la vegetación predominante de la cuenca del Golfo lo que permitiría dilucidar cuales especies vegetales conservan su registro en el perfil sedimentario.

8. Referencias

- Adame, M. F., Kauffman, J. B., Medina, I., Gamboa, J. N., Torres, O., Caamal, J. P., Reza, M., y Herrera-Silveira, J. A. (2013). Carbon stocks of tropical coastal wetlands within the karstic landscape of the Mexican Caribbean. *PloS one*, 8(2), e56569.
- Alcorlo, P. (2014). Los humedales en España. Consultado en: <http://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/agua-y-ecosistemas/humedales>.
- Alongi, D. M. (2002). Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental conservation*, 29(3), 331-349.
- Álvarez, A. M., y Bernal, G. R. (2007). Estimación del campo de transporte neto de sedimentos en el fondo de Bahía Colombia con base en análisis de tendencia del tamaño de grano. *Avances en recursos Hidráulicos*, 16, 41-50.
- Ankit, Y., Mishra, P. K., Kumar, P., Jha, D. K., Kumar, V. V., Ambili, V., y Anoop, A. (2017). Molecular distribution and carbon isotope of n-alkanes from Ashtamudi Estuary, South India: Assessment of organic matter sources and paleoclimatic implications. *Marine Chemistry*, 196, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2017.08.002>.
- Aramburo, C. I., Montoya-Arango, V., Tobón-Giraldo, D. M., Portela-García, J. C., Aramburo-Siegert, C. I., Montoya-Arango, V., Tobón-Giraldo, D. M., y Portela-García, J. C. (2018). Territorios tradicionales y aprovechamientos económicos en Urabá, Colombia. Ordenamientos productivos en ecosistemas de humedales. *Bitácora Urbano Territorial*, 28(3), 171-180. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v28n3.60476>.
- Arias I., C. A., y Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13(1), 17-24. <https://doi.org/10.18359/rcin.1321>.
- Arias, J., y Gómez, J. (2015). La planificación y gestión de los humedales de Andalucía en el marco del Convenio Ramsar. *Investigaciones Geográficas*, 63, 117. <https://doi.org/10.14198/INGEO2015.63.08>.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., y Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological monographs*, 81(2), 169-193.
- Bernal, G., Montoya, L. J., Garizábal, C., y Toro, M. (2005). La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del Golfo de Urabá, Colombia. *Gestión y ambiente*, 8(1), 123-135.
- Betancur, S. B., Gastmans, D., Vásquez, K. V., Santarosa, L. V., Santos, V. dos, y Kirchheim, R. E. (2020). Hydrological responses in equatorial watersheds indicated by Principal Components Analysis (PCA)—study case in Atrato River Basin (Colombia). *RBRH*, 25.
- Betancurth, L., F. Preusser, D. Mueller, C. Rambeau, y J. Cañón. 2020. First luminescence chronology of late Holocene deposits of the tropical Atrato Delta, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102813 <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102813>.

- Bethell, L. 1984 *The Cambridge history of Latin America*, vol 2. Cambridge University press, UK
- Blanco, J. F. (2009). Banana crop expansion and increased river-borne sediment exports to the Gulf of Urabá, Caribbean coast of Colombia. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 38(3), 181-183.
- Blanco, J. F., Ortiz, L. F., y Urrego, L. E. (2015). Reservorios de biomasa aérea y de carbono en los manglares del golfo de Urabá (Caribe colombiano). *Actualidades Biológicas*, 37(103), 131-141.
- Blanco, J. F. (2016). Cambios globales en los manglares del golfo de Urabá (Colombia): Entre la cambiante línea costera y la frontera agropecuaria en expansión. *Actualidades Biológicas*, 38(104), 53-70. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.v38n104a06>.
- Bray, E., y Evans, E. (1961). Distribution of n-paraffins as a clue to recognition of source beds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 22(1), 2-15.
- Burbano, J., Molina, M. A., Gutiérrez, C., Ochoa, J. M., Ayazo, R. A y Cardona, D. (2020). Estado de conservación y transformación de los humedales en Colombia. En: Moreno, L. A., Andrade, G. I., Didier, G y Hernández-Manrique, O.L. (Eds.). *Biodiversidad 2020. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Bogotá, D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 112p.
- Camacho, J. S. (2018). *Uso de proxies n-alcanos y Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers (CDGTs) para la reconstrucción paleoambiental del lago Gatún, Panamá*. Tesis Doctoral. Uniandes
- Chapin III, F. S., Kofinas, G. P., Folke, C., & Chapin, M. C. (2009). *Principles of ecosystem stewardship: Resilience-based natural resource management in a changing world*. Springer Science y Business Media.
- Charman, D. (2002). Peatlands and environmental change. *Peatlands and Environmental Change*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20023090783>.
- Chevillot, P., Giraldo, L., Molina Márquez, C., y Molina Márquez, A. (1993). Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá.
- CORPOURABÁ, Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá. 2003. *Caracterización y zonificación de los manglares del Golfo de Urabá*. Apartadó, Antioquia, Colombia.
- Correa, C. A. (1996). Biological markers, Extraction and Uses; Marcadores Biológicos, Extracción y Usos. *Revista Universidad EAFIT*. (101); p. 97-108
- Correa, I. D., y Alcántara, J. (2005). Historical and recent shore erosion along the Colombian Caribbean coast. *Journal of coastal research*, 52-57.
- Cortés, J., y Vilarity, S. P. (2016). Principios y criterios para la delimitación de humedales continentales. Una herramienta para fortalecer la resiliencia y la adaptación al cambio climático en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

- Cranwell, P. (1973). Branched-chain and cyclopropanoid acids in a recent sediment. *Chemical Geology*, 11(4), 307-313.
- Cui, Z., Lai, Q., Dong, C., y Shao, Z. (2008). Biodiversity of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria from deep sea sediments of the Middle Atlantic Ridge. *Environmental Microbiology*, 10(8), 2138-2149.
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., y Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature geoscience*, 4(5), 293-297.
- Eglinton, G., Gonzalez, A. G., Hamilton, R. J., y Raphael, R. A. (1962). Hydrocarbon constituents of the wax coatings of plant leaves: A taxonomic survey. *Phytochemistry*, 1(2), 89-102. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)88006-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)88006-1).
- Eglinton, G., y Hamilton, R. J. (1967). Leaf Epicuticular Waxes: The waxy outer surfaces of most plants display a wide diversity of fine structure and chemical constituents. *Science*, 156(3780), 1322-1335.
- Elliott, M., Burdon, D., Hemingway, K. L., y Aritz, S. E. (2007). Estuarine, coastal and marine ecosystem restoration: Confusing management and science—a revision of concepts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 74(3), 349-366.
- Farnsworth, E., y Ellison, A. (1998). The global conservation status of mangroves. *Oceanographic Literature Review*, 1(45), 138-139.
- Ficken, K. J., Barber, K. E., y Eglinton, G. (1998). Lipid biomarker, $\delta^{13}\text{C}$ and plant macrofossil stratigraphy of a Scottish montane peat bog over the last two millennia. *Organic Geochemistry*, 28(3-4), 217-237.
- Ficken, K. J., Li, B., Swain, D. L., y Eglinton, G. (2000). An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic geochemistry*, 31(7-8), 745-749.
- Global Volcanism Program, 2016. Eruptions, Earthquakes & Emissions, v. 1.0 (internet application). Smithsonian Institution. Accedido 15 Marzo 2024 (<https://volcano.si.edu/E3/>).
- Hernández, V. (2018). Desarrollo de una metodología mediante acoplamiento de bioaumentación, bioestimulación y bioventeo para la remediación de un suelo costero contaminado con hidrocarburos intemperizados. 139.
- Herrera, A. V., Leierer, L., Jambriña, M., Connolly, R., y Mallol, C. (2020). Evaluating different methods for calculating the Carbon Preference Index (CPI): Implications for palaeoecological and archaeological research. *Organic Geochemistry*, 146, 104056.
- Hoffmann, B., Kahmen, A., Cernusak, L. A., Arndt, S. K., y Sachse, D. (2013). Abundance and distribution of leaf wax n-alkanes in leaves of Acacia and Eucalyptus trees along a strong humidity gradient in northern Australia. *Organic Geochemistry*, 62, 62-67.
- INVEMAR, 2019. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2018. Serie de Publicaciones Periódicas No. 3. Santa Marta. 200 p.

- James, L. A. (2013). Legacy sediment: Definitions and processes of episodically produced anthropogenic sediment. *Anthropocene*, 2, 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2013.04.001>.
- Korus, J. T., y Fielding, C. R. (2015). Asymmetry in Holocene river deltas: Patterns, controls, and stratigraphic effects. *Earth-Science Reviews*, 150, 219-242.
- Kristensen, E., y Andersen, F. (1987). Determination of organic carbon in marine sediments: A comparison of two CHN-analyzer methods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 109(1), 15-23.
- Kumar, M., Boski, T., González, F. J., de la Rosa, J. M., y González, J. A. (2020). Discerning natural and anthropogenic organic matter inputs to salt marsh sediments of Ria Formosa lagoon (South Portugal). *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 28962-28985. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09235-9>.
- Li, C., Ma, S., Xia, Y., He, X., Gao, W., y Zhang, G. (2020). Assessment of the relationship between ACL/CPI values of long chain n-alkanes and climate for the application of paleoclimate over the Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 544, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.02.028>.
- Li, S., Xia, X., Zhang, S., y Zhang, L. (2020b). Source identification of suspended and deposited organic matter in an alpine river with elemental, stable isotopic, and molecular proxies. *Journal of Hydrology*, 590, 125492.
- Liebezeit, G., y Wöstmann, R. (2009). N-alkanes as indicators of natural and anthropogenic organic matter sources in the Siak River and its Estuary, E Sumatra, Indonesia. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 83(3), 403-409.
- Liebezeit, G., Wöstmann, R., y Ziehe, D. (2014). Biomarkers in the Siak River System, E. Sumatra, Indonesia. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 11(1), 25-40.
- Liu, X., Li, X., Liu, Y., Yang, L., Li, Q., Wu, F., Yu, H., & Huang, F. (2018). Insights into the origin of purely sediment-derived Himalayan leucogranites: Si-O isotopic constraints. *Science Bulletin*, 63(19), 1243-1245.
- Liu, C., Li, Z., Berhe, A. A., y Hu, B. X. (2020). Chapter Six - The isotopes and biomarker approaches for identifying eroded organic matter sources in sediments: A review. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 162, pp. 257-303). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.005>.
- Marulanda, L. O., Uribe, A., Velásquez, P., Montoya, M. Á., Idárraga, Á., López, M. C., y López, J. M. (2003). Estructura y composición de la vegetación de un fragmento de bosque seco en San Sebastián, Magdalena (Colombia). I. Composición de plantas vasculares. *Actualidades biológicas*, 25(78), 1-14.
- Maselli, V., Trincardi, F., Asioli, A., Ceregato, A., Rizzetto, F., y Taviani, M. (2014). Delta growth and river valleys: The influence of climate and sea level changes on the South Adriatic shelf (Mediterranean Sea). *Quaternary Science Reviews*, 99, 146-163.

- Mateo, Z. R. P., y Siringan, F. P. (2016). Morphological and Sedimentological Signatures of Late Holocene Prodelta Lobes in Lingayen Gulf, Philippines. *Journal of Coastal Research*, 32(2), 354-364.
- Mayewski, P. A., Rohling, E. E., Stager, J. C., Karlén, W., Maasch, K. A., Meeker, L. D., Meyerson, E. A., Gasse, F., Kreveld, S. van, Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R. R., y Steig, E. J. (2004). Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62(3), 243-255. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.07.001>.
- Meyers, P. A. (2003). Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic geochemistry*, 34(2), 261-289.
- Molina, A., Molina, C., y Chevillot, P. (1992). La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. *Boletín científico CIOH*, 11, 43-58.
- Montes, L. B., y Barriga, J. E. C. (2021). Paleoenvironmental Interpretation of Last Millennium Sediments in the Marriaga Swamp, Atrato Delta, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(1), Art. 1. <https://doi.org/10.18359/rcin.5071>.
- Montoya, L. J., y Toro, M. (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá, Colombia. *Avances en recursos hidráulicos*, (13): 37-54. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/view/9338>.
- Núñez, J. R. (2017). Empleo de biomarcadores para la reconstrucción paleoambiental de Cartagena (SE España) durante el holoceno [Masters, E.T.S.I de Minas y Energía]. <https://oa.upm.es/47327/>.
- Ortiz, J. E., Moreno, L., Torres, T., Vegas, J., Ruiz-Zapata, B., García-Cortés, Á., Galán L, Pérez-González, A. 2013. A 220 ka palaeoenvironmental reconstruction of the Fuentillejo maar lake record (Central Spain) using biomarker analysis. *Organic Geochemistry*, 55, 85–97. <https://doi:10.1016/j.orggeochem.2012.11>.
- Ortiz, A., Robles, K., Urrego, L. E., Romero, M., (2018). Diversidad e interacciones biológicas en el ecosistema de manglar. *Revista de Ciencias*, 22(2), 111-127. <https://doi.org/10.25100/rc.v22i2.7925>.
- Pang, S., Zhang, S., Lv, X., Han, B., Liu, K., Qiu, C., Wang, C., Wang, P., Toland, H., y He, Z. (2016). Characterization of bacterial community in biofilm and sediments of wetlands dominated by aquatic macrophytes. *Ecological Engineering*, 97, 242-250.
- Pérez, J. M. (2015). Macroinvertebrados bentónicos y su relación con el estado del bosque de ribera y las condiciones fisicoquímicas en una zona de la Cuenca Alta del río Tunjuelo.
- Posada, W. A., Castañeda, I. M., Cadena, B., González, S. A., Sierra, O. R., Ramos, J., Parra, F. J., Grajales, H., y Rúa, A. (2023). Ancient water management and the evolution of the late Holocene wetlands. First paleoecological evidence from prehispanic raised fields of Urabá, northwestern South America. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 51, 104187.

- Quijano, M. L., y Castro, J. M. (2015). Estratigrafía molecular: Los biomarcadores como indicadores de cambios climáticos y ambientales en la historia del Sistema Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(2), 180-180.
- Rao, Z., Zhu, Z., Wang, S., Jia, G., Qiang, M., y Wu, Y. (2009). CPI values of terrestrial higher plant-derived long-chain n-alkanes: A potential paleoclimatic proxy. *Frontiers of Earth Science in China*, 3, 266-272. <https://doi.org/10.1007/s11707-009-0037-1>.
- Rielley, G., Collier, R., Jones, D., y Eglinton, G. (1991). The biogeochemistry of Ellesmere Lake, UK—I: source correlation of leaf wax inputs to the sedimentary lipid record. *Organic Geochemistry*, 17(6), 901-912.
- Rúa, A., Liebezeit, G., y Palacio, J. (2014). Mercury colonial footprint in Darién Gulf sediments, Colombia. *Environmental earth sciences*, 71(4), 1781-1789.
- Rúa, A., Liebezeit, G., Molina, R., & Palacio, J. 2016. Unmixing progradational sediments in a southwestern Caribbean gulf through late Holocene: backwash of low-level atmospheric jets. *Journal of Coastal Research*, 32(2), 397-407.
- Santana, J. de S., Leal, I. de D. G., Queiroz, A. F. de S., Assumpção, H. C. P., Souza, J. R. B. de, Zucchi, M. do R., y Albergaria-Barbosa, A. C. R. de. (2023). Fontes de matéria orgânica para os sedimentos superficiais do estuário do rio Itapicuru (Bahia-Brasil). *Química Nova*, 46, 608-615.
- Schlesinger, W. H., y Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. Academic Press.
- Seki, O., Nakatsuka, T., Shibata, H., y Kawamura, K. (2010). A compound-specific n-alkane $\delta^{13}\text{C}$ and δD approach for assessing source and delivery processes of terrestrial organic matter within a forested watershed in northern Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(2), 599-613.
- Shen, X., Toorman, E., Shao, Y., y Fettweis, M. (2019). Multi-class floc size distributions of cohesive sediments at station Xuliujing of the Changjiang River Estuary. 83-85.
- Silveti, F., y Cáceres, D. M. (2015). La expansión de monocultivos de exportación en Argentina y Costa Rica: Conflictos socioambientales y lucha campesina por la justicia ambiental. *Mundo agrario*, 16(32), 00-00.
- Smol, J. P. (2010). The power of the past: Using sediments to track the effects of multiple stressors on lake ecosystems. *Freshwater Biology*, 55(s1), 43-59. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02373.x>.
- Suárez, M. E., y Téllez, O. (2014). Red de áreas prioritarias para la conservación de la biodiversidad del Eje Volcánico Transmexicano analizando su riqueza florística y variabilidad climática. *Polibotánica*, (38), 67-93.
- Summons, R. E., y Lincoln, S. A. (2012). Biomarkers: Informative molecules for studies in geobiology. *Fundamentals of geobiology*, 269-296.

- Sun, M. Y., Dafforn, K. A., Johnston, E. L., y Brown, M. V. (2013). Core sediment bacteria drive community response to anthropogenic contamination over multiple environmental gradients. *Environmental microbiology*, 15(9), 2517-2531.
- Susan, T. M., Velázquez, N., y Krömer, T. (2015). Cambios en las características funcionales de epífitas vasculares de bosque mesófilo de montaña y vegetación secundaria en la región central de Veracruz, México. *Botanical Sciences*, 93(1), 153. <https://doi.org/10.17129/botsci.228>.
- Thomas, Y. F., Cesaraccio, M., Garc, C., y Ménanteau, L. (2007). Contribución de la hidrografía histórica al estudio de la cinemática de los fondos marinos: Evolución del golfo de Urabá, Colombia. *Boletín científico CIOH*, 25, 110-119.
- Townsend, M., Davies, K., Hanley, N., Hewitt, J. E., Lundquist, C. J., & Lohrer, A. M. (2018). The challenge of implementing the marine ecosystem service concept. *Frontiers in Marine Science*, 5, 359.
- Velásquez, M., y Poveda, G. (2016). Estimación del balance hídrico de la región Pacífica. *Dyna*, 86(208), 297-306.
- Vélez, C., y Aguirre, N. (2016). Influencia del río Atrato en el golfo de Urabá durante el holoceno tardío, mar Caribe Colombiano. *Boletín de investigaciones marinas y costeras-INVEMAR*, 45(1), 73-97.
- Yáñez, A. (1978). Taxonomía, ecología y estructura de las comunidades de peces en lagunas costeras con bocas efímeras del Pacífico de México. *Publicaciones especiales-Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM*, 2, 1-306.
- Yao, Y., Song, J., y Wei, X. (2022). The fate of carbon in check dam sediments. *Earth-Science Reviews*, 224, 103889. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103889>.
- Yu, D., Guo, Z., y Li, L. (2016). Research of oxygen concentration information detecting method with LIA. 1022-1027.
- Zamora, P., García, G., Flores, J. S., y Ortiz, J. J. (2008). Estructura y composición florística de la selva mediana subcaducifolia en el sur del estado de Yucatán, México. *Polibotánica*, 26, 39-66.
- Zech, M., Tuthorn, M., Detsch, F., Rozanski, K., Zech, R., Zöller, L., Zech, W., y Glaser, B. (2013). A 220 ka terrestrial $\delta^{18}\text{O}$ and deuterium excess biomarker record from an eolian permafrost paleosol sequence, NE-Siberia. *Chemical Geology*, 360, 220-230.
- Zeng, J., Li, Z., Chen, Q., Bi, H., Qiu, J., y Zou, P. (2015). Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations. *Remote Sensing of environment*, 163, 91-110.